

Análise de Sobrealcance para Falhas Externas a Linhas de Transmissão Longas Paralelas

Marcos R. Araújo*. Clever Pereira**

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica — Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil (e-mail: marcosraraujo@hotmail.com).

** Departamento de Engenharia Elétrica — Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil (e-mail: clever@ufmg.br).

Abstract: This work presents an analysis of overreach for external faults using a distance protection algorithm adequate for long parallel transmission lines. The test system was modeled with a medium single-circuit line upstream and another downstream of two long parallel transmission lines. Sliding faults were applied along the lines using graph theory and symmetrical components. The results showed a weakness of the evaluated algorithm regarding overreach for faults ahead of the protected line.

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise de sobrealcance para falhas externas ao se utilizar um algoritmo de proteção de distância adequado para linhas de transmissão longas paralelas. O sistema teste foi modelado com uma linha de transmissão média de circuito simples a montante e outra a jusante de duas linhas de transmissão longas paralelas. Falhas deslizantes foram aplicadas ao longo das linhas utilizando a teoria de grafos e componentes simétricas. Os resultados mostraram uma fragilidade do algoritmo avaliado no que concerne ao sobrealcance para falhas em linhas de transmissão à frente da protegida.

Keywords: distance protection algorithm; graph; parallel transmission lines; fault resistance, overreach.

Palavras-chaves: algoritmo de proteção de distância; grafo; linhas de transmissão paralelas; resistência de falta; sobrealcance.

1. INTRODUÇÃO

A proteção de distância convencional foi concebida a partir de um modelo de linha de transmissão (LT) curta. Com o propósito de empregar a proteção de distância em uma LT de 645 km na China, Xu et al. (2008) derivaram um algoritmo de proteção partindo do modelo π equivalente, sendo tal algoritmo aplicável a LTs longas de circuito simples. Baseando-se no esquema apresentado por Xu et al. (2008), Araújo e Pereira (2017) sugeriram um algoritmo de proteção de zona 1 adequado para LTs longas paralelas equilibradas, sendo os efeitos capacitivo, de propagação e do acoplamento mútuo de sequência zero plenamente considerados. Em uma análise preliminar, na qual o impacto da resistência de falta (R_F) no desempenho do algoritmo deduzido em Araújo e Pereira (2017) foi avaliado, foi constatada uma predominância de ocorrência de fenômenos de sobrealcance, sobretudo quando fontes fortes foram envolvidas — o que é típico de sistemas que compreendem LTs longas. Os sobrealcances então apurados para curtos-circuitos internos, aplicados no trecho posterior ao limite do alcance da característica de operação da zona 1, sugeriram uma alta probabilidade de sobrealcance também para falhas externas. Destarte, o objetivo deste trabalho é examinar a hipótese de sobrealcance para falhas aplicadas em LTs externas a LTs longas paralelas utilizando o algoritmo de proteção de Araújo e Pereira (2017) com parâmetros de compensação de sequência zero constantes, em uma abordagem prática. Por se

tratarem de testes extensivos do algoritmo de proteção, não faz parte do escopo deste trabalho análises no domínio do tempo, as quais são consideradas para trabalhos futuros.

Este artigo está organizado em quatro seções. A Seção 2 minuciosa a metodologia de simulação de curtos-circuitos. A Seção 3 apresenta e discute os resultados apurados. A Seção 4 conclui este artigo.

2. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

Na Fig. 1 é exposto o diagrama unifilar do sistema modelado com duas LTs externas de circuito simples, uma a montante (LTM) e outra a jusante (LTJ) das LTs paralelas de 800 km de extensão (LT1 e LT2), tendo cada LT externa um comprimento total de 100 km e configurações idênticas às de cada LT paralela, consoante Dias (2008). Os parâmetros unitários sequenciais das linhas paralelas e externas são detalhados na Tabela 1. Bancos de 10 transformadores de 2000 MVA cada, com reatância de sequência positiva de 13,4%, foram admitidos para T e T' (DIAS et al., 2011). Dados típicos de impedâncias equivalentes de fontes fortes, médias e fracas, os quais são especificados na Tabela 2, foram usados oportunamente para F e F', tendo sido calculados conforme Chen e Maun (2000). Os diagramas de impedância sequenciais para o sistema da Fig. 1 e o grafo orientado associado aos mesmos diagramas são apresentados respectivamente na Fig. 2 e na Fig. 3.

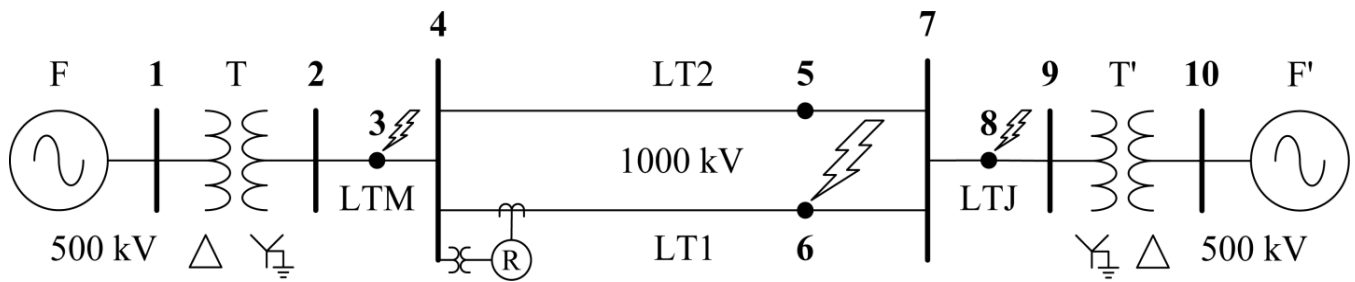


Fig. 1 Diagrama unifilar do sistema modelado com LTs externas.

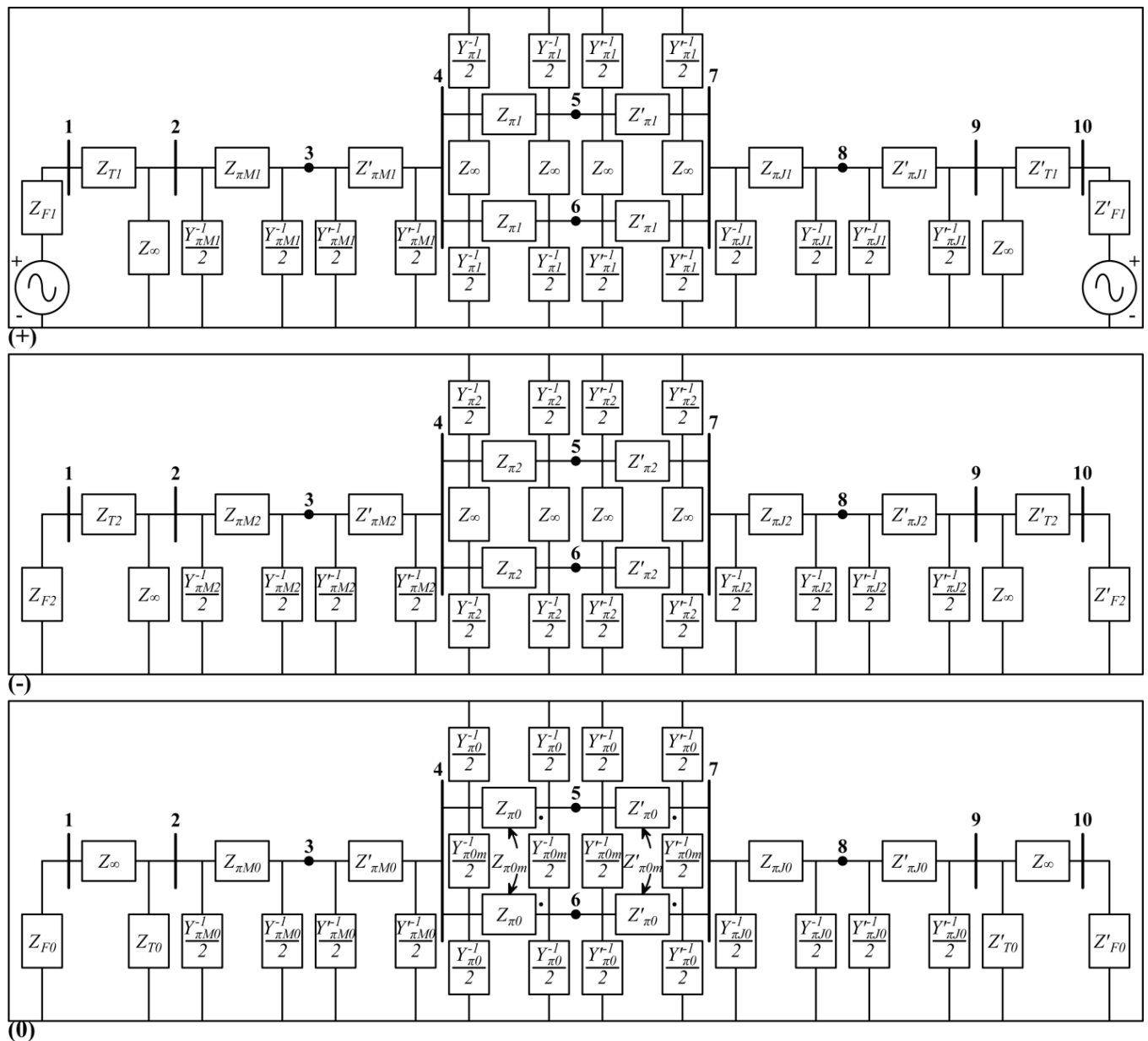


Fig. 2 Diagramas de impedância sequenciais do sistema modelado com LTs externas.

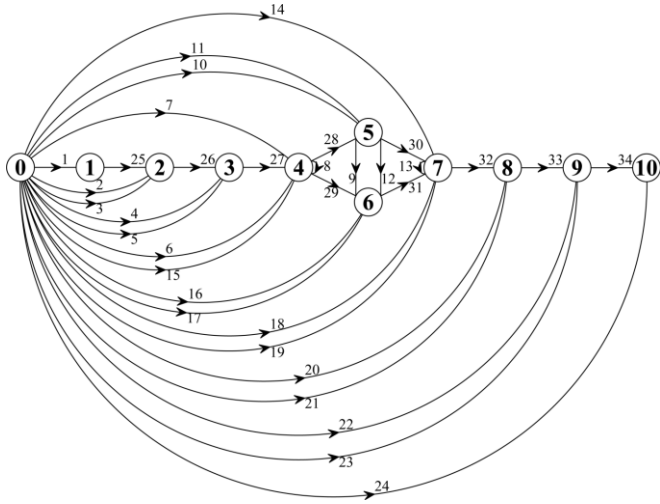


Fig. 3 Grafo orientado para o sistema modelado com LTs externas.

Tabela 1. Parâmetros unitários sequenciais das LTs

Parâmetro	Sequência positiva	Sequência zero	Mútua de sequência zero
R (Ω/km)	0,0054697	0,34429	0,32036
L (mH/km)	0,4532	3,1751	1,4915
C (nF/km)	25,823	9,6584	-0,32295

Tabela 2. Impedâncias equivalentes das fontes

Tipo	Sequência positiva (Ω)	Sequência zero (Ω)
Forte	0,079408 + j4,5493	0,23819 + j6,8208
Média	0,89298 + j17,039	1,7835 + j16,969
Fraca	4,957 + j56,659	19,752 + j112,02

Os parâmetros de sequência positiva, negativa e zero dos circuitos π equivalentes em cascata correspondentes aos modelos de LTM e LTJ foram determinados conforme Pereira (2015), assim como os parâmetros equivalentes de sequência positiva e negativa dos modelos de LT1 e LT2 (ver Fig. 2). Já os parâmetros dos circuitos π equivalentes de sequência zero das LTs paralelas foram definidos em concordância com Kang e Liao (2012). As fontes F e F' foram ajustadas para que a tensão pré-falta na barra 4 fosse 1 pu com ângulo 0° e o carregamento pré-falta de cada LT paralela fosse sua potência natural. O cálculo dos curtos-circuitos foi realizado no software MATLAB utilizando a teoria de grafos e componentes simétricas, como em Pereira (2015). A abordagem matricial de cálculo é ilustrada sumariamente na Fig. 4, sendo que maiores detalhes podem ser verificados em Pereira (2015).

Uma unidade de medição quadrilateral baseada em um relé comercial foi adotada para o relé R (SIEMENS, 2011). Foi definido um alcance de 85% da impedância de sequência positiva de LT1 para a impedância réplica do trecho protegido.

O algoritmo de proteção testado é descrito por Araújo e Pereira (2017):

$$Z_{RNC} = \frac{Z_1}{\gamma_1} \tanh^{-1} \left[\frac{V_a + k_{vp} V_0}{(I_a + k_{ip} I_0 + k_{mi} I_{OS}) Z_{C1}} \right] \quad (1)$$

em que V_a é a tensão da fase A medida pelo relé, I_a é a corrente da fase A medida pelo relé, I_0 é a corrente de sequência zero medida pelo relé R (I_0) ou pelo relé da linha sã (I_{OS}), Z_1 é a impedância longitudinal unitária de sequência positiva, γ_1 é a constante de propagação de sequência positiva, Z_{C1} é a impedância característica de sequência positiva e os parâmetros de compensação de sequência zero são da forma

$$k_{vp} = \frac{\cosh(\gamma_{m2} x) - \cosh(\gamma_1 x)}{\cosh(\gamma_1 x)} \quad (2)$$

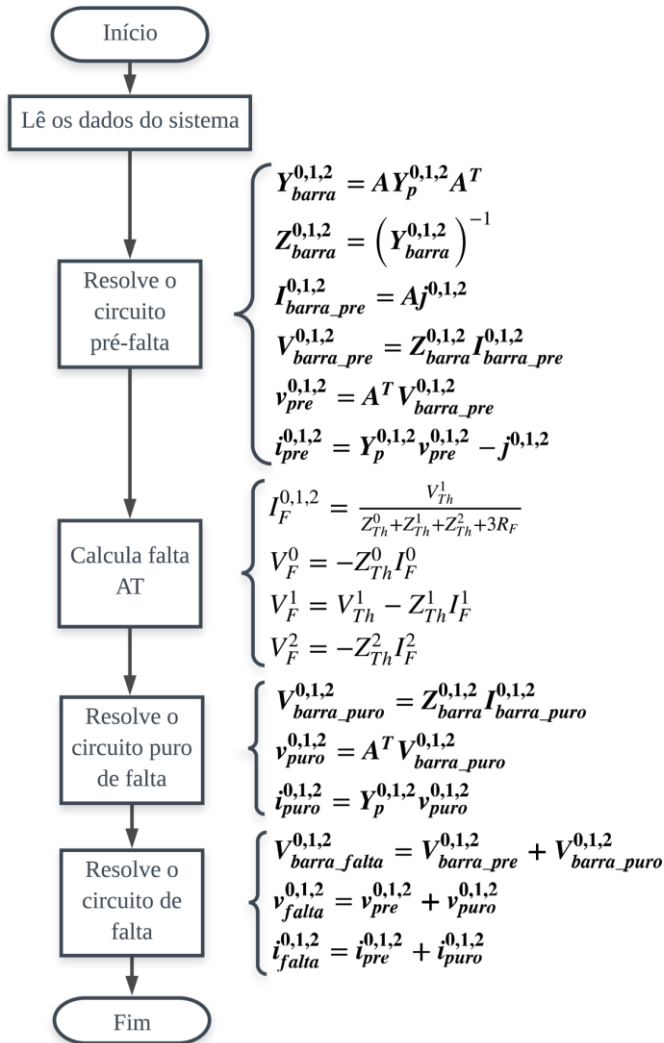


Fig. 4 Fluxograma da rotina computacional desenvolvida para o cálculo de defeitos AT.

$$k_{lp} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2}x) + Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1}x)}{2Z_{C1} \sinh(\gamma_1x)} - 1 \quad (3)$$

$$k_{ml} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2}x) - Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1}x)}{2Z_{C1} \sinh(\gamma_1x)} \quad (4)$$

sendo x a distância entre o relé e o ponto de falta, γ_{m2} a constante de propagação do modo 2, γ_{m1} a constante de propagação do modo 1, Z_{Cm2} a impedância característica do modo 2 e Z_{Cm1} a impedância característica do modo 1.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Admitindo diferentes sistemas terminais, estabelecidos a partir da Tabela 2, curtos-circuitos AT foram simulados nas barras 3, 6 e 8 — barras deslizantes — respectivamente ao longo dos comprimentos totais de LTM, LT1 e LTJ, com passo de 8 km, para valores de R_F variando de 0 a 150 Ω , com passo de 10 Ω . A Fig. 5 exibe as impedâncias aparentes vistas pela unidade AT de R usando o algoritmo não convencional com parâmetros de compensação de sequência zero constantes, calculados admitindo uma distância até o ponto de falta (x) igual ao limite do alcance da zona 1, ou seja, 85% da extensão total de LT1. As impedâncias aparentes apuradas para defeitos aplicados nas linhas a montante e a jusante são distintas pela cor interna dos marcadores, de modo que para LTM foi adotado um gradiente de branca a verde, ao passo que para LTJ, de branca a vermelha. Impedâncias aparentes vistas para faltas aplicadas ao longo de LT1 são também distintas pela cor interna dos marcadores, mas por um gradiente de branca a azul. A impedância de sequência positiva de LT1 (Z_L) é destacada por uma linha tracejada. Impedâncias aparentes calculadas para curtos-circuitos aplicados no terminal emissor, no limite do alcance da zona 1 e no terminal receptor são realçadas por um círculo em verde, um triângulo em amarelo e um quadrado em vermelho, respectivamente. As correntes I_a , I_0 e I_{0s} foram computadas como $I_a(29) - I_a(15)$, $I_0(29) - I_0(15)$ e $I_0(28) - I_0(7)$, de modo respectivo, haja vista a Fig. 3. A Tabela 3 minuciosa para cada configuração de fontes os valores de R_F para os quais se verificou sobrealcançe de LTM e/ou LTJ, ademais dos valores máximos quantificados para tal fenômeno ($O_{máx}$) em porcentagens da extensão total de cada linha externa. O hífen indica que não houve sobrealcançe.

Um aspecto notável é o fato de R empregar um algoritmo de proteção adequado para LTs paralelas e tanto LTM quanto LTJ possuírem circuitos simples. Isso faria com que houvesse desvios das impedâncias aparentes vistas para curtos-circuitos externos com relação àquelas de sequência positiva dos trechos defeituosos mesmo se k_{vp} , k_{lp} e k_{ml} tivessem sido calculados admitindo um conhecimento prévio de x . Avaliando o sobrealcançe de R para faltas externas na Fig. 5, percebe-se que não há sobrealcançe de LTM para configurações em que se adotou F'_{forte} . À proporção que se enfraquece F' , mantendo a característica de F, tal fenômeno passa a ocorrer geralmente se intensificando, do mesmo modo que ao se enfraquecer F para F' com impedâncias equivalentes típicas de fontes médias ou fracas.

Tabela 3. Valores de R_F para os quais R sobrealcançou LTM e/ou LTJ e sobrealcançes máximos apurados para cada configuração de fontes

Configuração	LTM		LTJ	
	R_F	$O_{máx}$	R_F	$O_{máx}$
F_{forte}, F'_{forte}	-	-	20:10:110 (Ω)	$\approx 20\%$ (ℓ)
$F_{forte}, F'_{média}$	0, 10 e 20 (Ω)	$\approx 52\%$ (ℓ)	40:10:150 (Ω)	100% (ℓ)
F_{forte}, F'_{fraca}	0:10:140 (Ω)	$\approx 92\%$ (ℓ)	90:10:150 (Ω)	100% (ℓ)
$F_{média}, F'_{forte}$	-	-	20:10:150 (Ω)	100% (ℓ)
$F_{média}, F'_{média}$	0:10:150 (Ω)	$\approx 36\%$ (ℓ)	80:10:150 (Ω)	100% (ℓ)
$F_{média}, F'_{fraca}$	10:10:150 (Ω)	100% (ℓ)	-	-
F_{fraca}, F'_{forte}	-	-	40:10:150 (Ω)	100% (ℓ)
$F_{fraca}, F'_{média}$	0:10:150 (Ω)	100% (ℓ)	-	-
F_{fraca}, F'_{fraca}	0:10:90 (Ω)	100% (ℓ)	-	-

Nada obstante, não se observam sobrealcançes de LTJ apenas para as configurações $F_{média}, F'_{fraca}$, $F_{fraca}, F'_{média}$ e F_{fraca}, F'_{fraca} . Dualmente, tal fenômeno se torna mais acentuado em geral quanto mais forte for F ou F' , sendo sua amplitude dependente do ajuste do alcance resistivo da característica de operação. Como via de regra sistemas compreendendo linhas longas envolvem ao menos uma fonte forte, o sobrealcançe para faltas em LTs à frente constitui uma fragilidade do algoritmo proposto, confirmando a hipótese levantada ao se estudar o impacto de R_F na performance do mesmo algoritmo de proteção. Salienta-se que tal vulnerabilidade também ocorre para o algoritmo convencional, da mesma forma que subalcançes para faltas a longas distâncias com resistências de falta baixas a moderadas.

A fim de comparação, na Fig. 6 são expostos os resultados obtidos com o algoritmo convencional para uma configuração F_{forte}, F'_{fraca} . Ao examiná-la, constata-se para o algoritmo convencional uma fragilidade similar à vista na Figura 5g, ou seja, sobrealcançe para faltas na LT à montante.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi averiguado o sobrealcançe para faltas externas ao se usar um algoritmo de proteção de distância não convencional com parâmetros de compensação de sequência zero constantes. Tendo em vista que LTs longas geralmente são conectadas a pelo menos uma fonte forte, confirmou-se o sobrealcançe para faltas em linhas à frente da protegida como uma fragilidade de tal algoritmo. Dado que nas análises foram consideradas impedâncias aparentes vistas em regime permanente de falta, não se pôde concluir incisivamente a respeito da coordenação dos relés do sistema, já que para isso seriam necessárias análises no domínio do tempo.

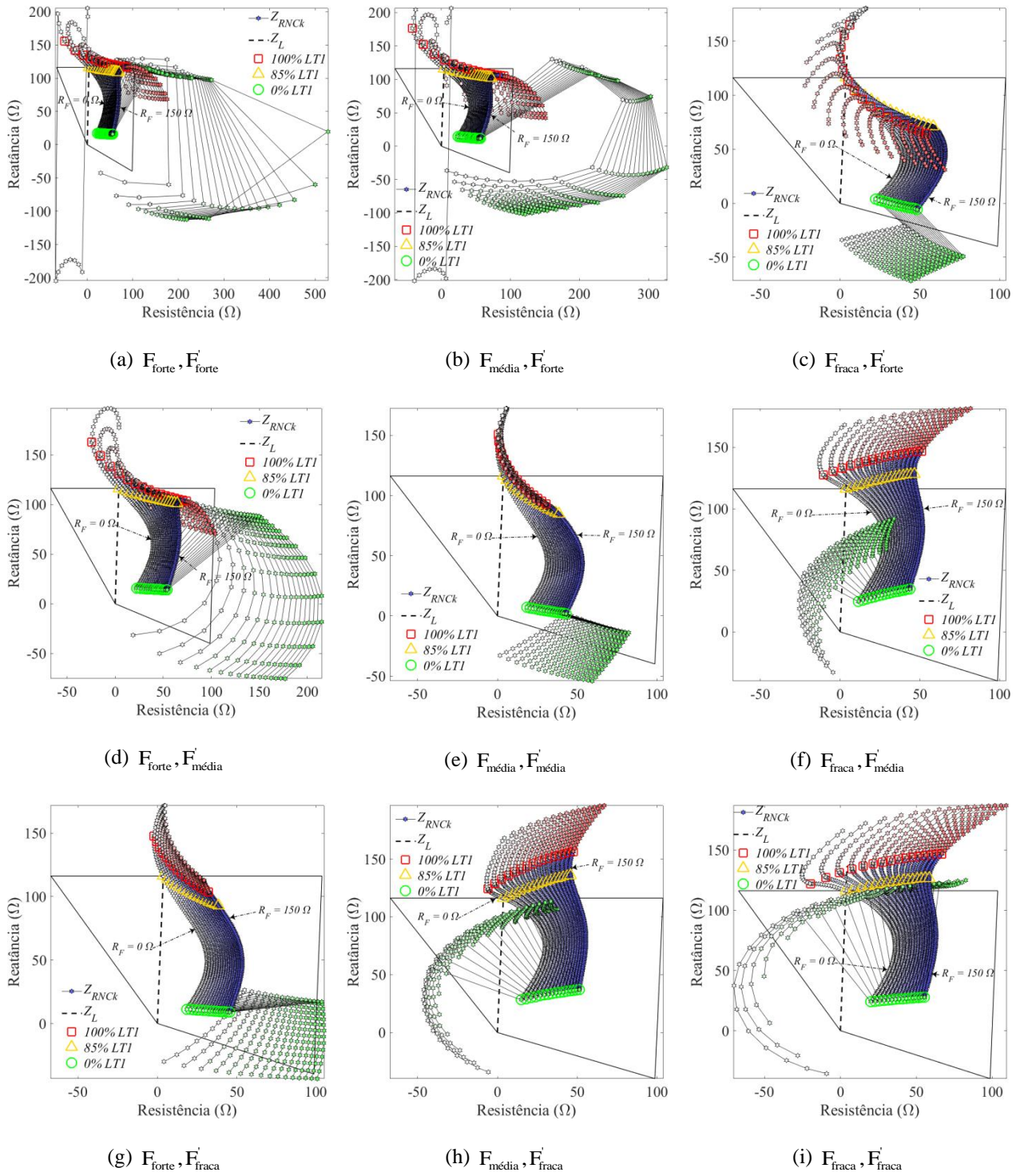


Fig. 5 Impedâncias aparentes vistas pela unidade AT de R utilizando o algoritmo proposto com k_{vp} , k_{lp} e k_{ml} constantes para faltas AT com $R_F = 0:10:150 \Omega$ aplicadas ao longo das linhas LTM, LT1 e LTJ.

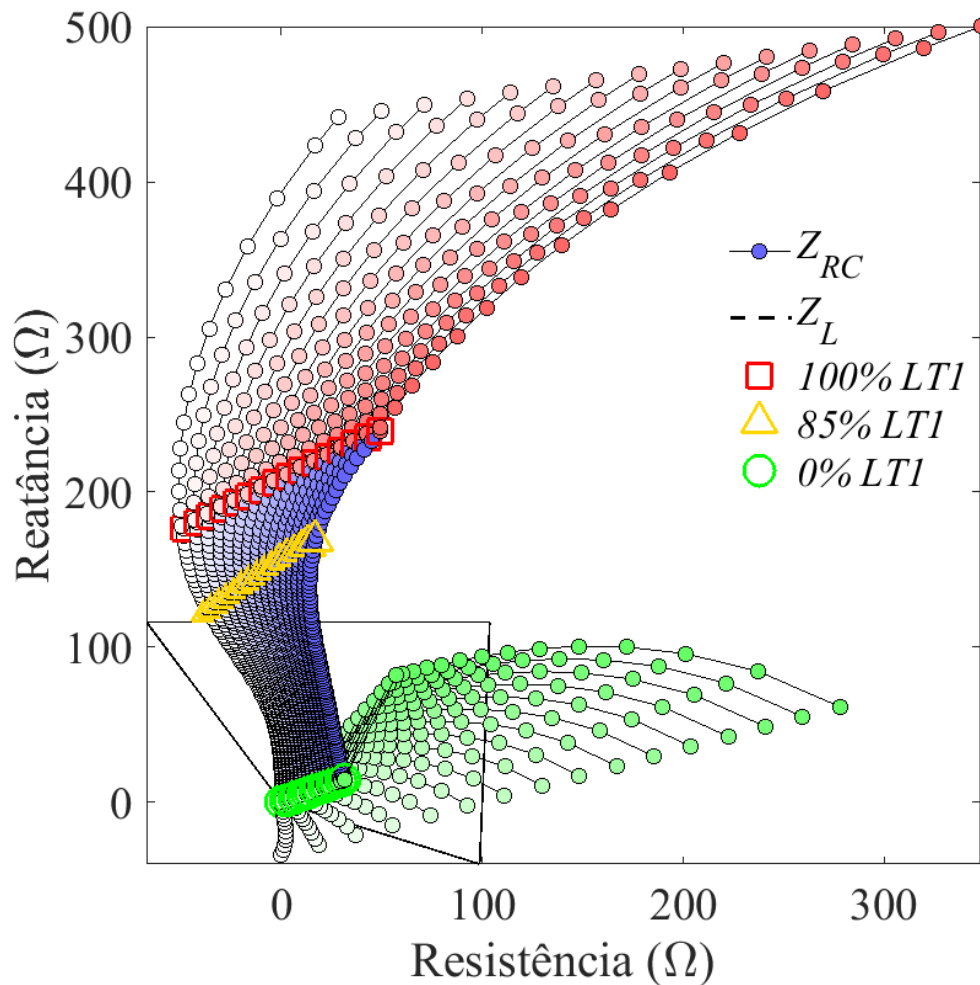


Fig. 6 Impedâncias aparentes vistas pela unidade AT de R utilizando o algoritmo convencional para uma configuração F_{forte}, F_{fraca} .

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES — Brasil.

REFERÊNCIAS

Xu, Z., Huang, S., Ran, Li, Liu, J., Qin, Y., Yang, Q. and He, J. (2008) A distance protection relay for a 1000-kV UHV transmission line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p.1795–1804.

Araújo, M. R. and Pereira, C. (2017) A practical first-zone distance relaying algorithm for long parallel transmission lines. *Electric Power Systems Research*, v. 146, p.17–24.

Dias, R. (2008) Derivação ou injeção de energia em uma linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda por dispositivos de eletrônica de potência. 261 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Dias, R., Lima, A., Portela, C. and Aredes, M. (2011) Extra long-distance bulk power transmission. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p.1440–1448.

Chen, Z. and Maun, J. (2000) Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 1, p. 370–375.

Pereira, C. (2015) *Redes elétricas no domínio da frequência: técnicas de análise, modelos de componentes, técnicas computacionais*. São Paulo: Artliber.

Kang, N. and Liao, Y. (2012) Equivalent PI circuit for zero-sequence double circuit transmission lines. In: *Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA. Proceedings... San Diego, CA: IEEE. p. 1 – 6.

SIEMENS. (2011) SIPROTEC: distance protection 7SA6. Nürnberg.